

基于层次分析法的鲜蕨麻干燥技术研究

韩俊豪¹, 谢永康^{1*}, 杨慧¹, 李萍¹, 李星仪¹, 张艳珍², 李子昂³

¹河南省农业科学院农产品加工研究中心 郑州 450002

²青海省轻工业研究所有限责任公司 西宁 810000

³河南农业大学国际教育学院 郑州 450002

摘要 为探究鲜蕨麻适宜的干燥技术,采用 6 种干燥技术【热风干燥(HAD)、热泵干燥(HPD)、碳纤维远红外干燥(CFFD)、碳纤维远红外联合热泵干燥(CFFCHPD)、真空脉动干燥(VPD)以及真空冷冻干燥(VFD)】对鲜蕨麻进行干燥处理,测定不同干燥技术对鲜蕨麻干燥时间、干燥能耗、外观品质(色泽、形状)、口感(物性)、味觉、复水比等感官特性、营养品质(还原糖、维生素 C)含量的影响,利用层次分析法对鲜蕨麻干燥技术进行综合评价。结果表明:采用 CFFCHPD 可有效缩短干燥时间,相较于 CFFD、HAD、HPD、VPD、VFD 分别缩短了 9.76%,21.95%,31.71%,60.98%,243.91%,采用 CFFCHPD、CFFD、HAD、HPD 干燥能耗具有显著性差异($P<0.05$),CFFCHPD 方式干燥时间及能耗最低,VPD 方式最高。鲜蕨麻干燥后亮度变暗,色泽偏红和偏黄,除 VFD 方式外,其它方式干燥后蕨麻的 L^* 值显著低于干燥前($P<0.05$), a^* 值和 b^* 值显著高于干燥前($P<0.05$);不同干燥方式蕨麻的弹性无显著性差异($P>0.05$),硬度、胶黏性及咀嚼性具有显著性差异($P<0.05$),其中 HPD 方式最高,VFD 最低;干燥后蕨麻丰富度差异明显;采用 VFD 方式干燥后蕨麻的复水性最好,相较于 VFD,其它干燥方式复水比分别降低了 9.97%,11.58%,12.61%,15.95%,19.18%。干燥后蕨麻的还原糖含量均显著提高($P<0.05$),相较于鲜蕨麻分别提高了 111.21%,106.57%,97.92%,93.46%,82.96%,60.28%,除 VFD 方式外,维生素 C 含量显著降低($P<0.05$),其中 VPD 方式还原糖含量最高,维生素 C 含量最低,VFD 方式还原糖含量最低,维生素 C 含量最高。采用层次分析法的综合评价结果为:CFFCHPD>HPD>CFFD>HAD>VFD>VPD,CFFCHPD 的综合评分最高,其次是 HPD,该研究为鲜蕨麻现代化干燥技术的应用提供借鉴。

关键词 蕨麻;干燥;感官评价;营养品质;层次分析法

文章编号 1009-7848(2026)01-0152-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2026.01.014

蕨麻(*Potentilla anserina*),是鹅绒委陵菜的变种,为蔷薇科委陵菜属多年生草本植物,又名人参果、延寿草、蓬菜果、莲花菜等^[1]。其富含淀粉、蛋白质、膳食纤维、氨基酸、维生素、矿物质、皂苷、多糖等多种营养和活性成分^[2],主要分布在中国东北、华北及西北地区,适宜种植在海拔 1 700~4 300 m 的高原环境中,喜潮湿,其中尤以青海省的分布区域最广,储量最高,品质最好^[3-4]。刚采收的蕨麻含水率在 60%左右,不易储运,干燥是延长蕨麻货架期的重要加工方式,目前蕨麻的干燥方式多以自

然晾晒为主,受天气和场地等因素影响较大,同时干燥效率低,卫生条件差,干燥后品质不稳定,因此,将现代化的干燥技术应用于蕨麻意义重大。

热风干燥(Hot air drying, HAD)技术^[5]是利用加热后的空气充当干燥介质,借助温度差将空气中的热量传递给物料,从而使物料水分蒸发而实现干燥,是工业化生产中最常用的干燥技术,其适用性强、经济性好,操作简单,然而热效率及能源利用率低。热泵干燥(Heat pump drying, HPD)技术^[6]同样利用热空气作为干燥介质,不同的是其可利用热泵系统对干燥介质除湿加热并回收热量,具有节能的优点,然而在干燥初期升温较慢。碳纤维远红外干燥(Carbon fiber far-infrared drying, CFFD)技术^[7]是利用红外辐射穿透物料表层并被物料内部的粒子吸收,加剧粒子的振动与摩擦,使物料升温脱水,具有加热能力强,升温速度快的优势。真空脉动干燥(Vacuum pulsed drying, VPD)

收稿日期: 2025-01-17

基金项目: 青海省中央引导地方科技发展资金项目(2023ZY022); 河南省农业科学院新兴学科发展专项(2024XK12)

第一作者: 韩俊豪,男,硕士,助理研究员

通信作者: 谢永康 E-mail: xykang@hnagri.org.cn

技术^[8-9]是真空干燥技术的改进,其特点是在干燥过程中周期性地改变干燥室内的压力,从而打破物料表面水蒸气压力平衡,具有更高的干燥效率。真空冷冻干燥(Vacuum freeze drying, VFD)技术^[10]利用物料中水分冻结后在负压条件下可快速升华排出,从而达到干燥的目的,可应用于热敏性物料,能更好地保留物料的营养成分。研究人员将碳纤维远红外干燥技术与热泵干燥技术组合成碳纤维远红外联合热泵干燥(Carbon fiber far-infrared combined heat pump drying, CFFCHPD)技术^[11],从而提高干燥室内温度分布的均匀性,降低能耗,有效解决干燥后期水分脱出缓慢的问题,同时目前碳纤维远红外加热技术还应用于真空脉动干燥技术上^[12-13],可有效提高物料加热的均匀性及营养品质。不同干燥技术相对应的装备结构与工作原理有较大差别,探究适宜的干燥技术应用于蕨麻是一个多因素、复杂的决策过程,需要综合考虑能耗、时间、感官品质、营养品质等指标。目前,多参数决策问题中指标权重的确定方法包括德尔菲法(Delphi)、层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)、熵值法、模糊聚类法、主成分分析法等,它们有其各自的优缺点及适用条件和范围^[14]。AHP是一种定性与定量相结合的方法,将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,通过分析各指标之间的关系,建立对比矩阵,从而可以较为合理地确定指标权重^[15]。

综上所述,为探究鲜蕨麻适宜的干燥技术,采用现代化干燥技术(HAD、HPD、CFFD、CFFCHPD、VPD、VFD)对鲜蕨麻进行干燥,并测量干燥能耗、干燥时间,结合消费者最关心的外观品质(色泽、形状)、气味、口感(物性)、味觉、复水比等指标进行感官评价和营养品质分析(还原糖、维生素C),利用AHP对鲜蕨麻干燥技术进行综合评价,确定最适宜的干燥技术,为优化鲜蕨麻干燥技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜蕨麻:品种为青海1号,水分含量为60%左右,采自青海省海西蒙古族藏族自治州都兰县,采收后经清洗、沥干后用薄膜袋包装置于4℃冰箱

贮存备用。

试剂:盐酸、硫酸铜、亚甲蓝、酒石酸钾钠、乙酸锌、冰乙酸、亚铁氰化钾、偏磷酸、草酸、碳酸氢钠、2,6-二氯酚、白陶土,均为分析纯级,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器、设备

碳纤维远红外联合热泵干燥机^[11](集电加热、热泵加热、碳纤维远红外加热于一体,可将不同加热方式进行联合或耦合),实验室自制;6PV-1真空脉动干燥机^[9],实验室自制;LGJ-25E真空冷冻干燥机,四环科仪科技发展河北有限责任公司;SA402B电子舌味觉分析系统,日本INSENT公司;WP-UPT-20标准型超纯水机,四川沃特水处理设备有限公司;CR-10PLUS色差仪,日本柯尼卡美能达公司;TMS-Pro物性分析仪,美国FTC公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验处理 挑选经清洗、沥干、无机械损伤、品质好、大小均一的鲜蕨麻为试验材料(500g),分别采用HAD技术、HPD技术、CFFD技术、CFFCHPD技术、VPD技术、VFD技术对鲜蕨麻进行干燥,温度设定为45℃,其中采用真空脉动干燥技术时,脉动比为12:3,采用真空冷冻干燥技术时,温度采用阶梯控制。试验过程前期每间隔0.5h称重1次,后期间隔1h称重1次,将鲜蕨麻干燥至湿基含水率12%^[16-17]后停止,每次试验重复3次,结果取平均值。

1.3.2 指标测定

1) 水分比:按式(1)、式(2)分别计算水分比和干基含水率^[16]。

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (1)$$

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \quad (2)$$

式中: M_R 为水分比; M_t 为干燥 t 时刻物料的干基含水率,g/g; M_0 为初始干基含水率,g/g; W_t 为干燥 t 时刻物料质量,g; G 为绝干物质质量,g。

2) 干燥速率:按式(3)计算干燥速率

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中: D_R 为干燥速率,g/(g·h); M_{t_1} 、 M_{t_2} 为干燥

t_1 和 t_2 时刻物料的干基含水率, g/g。

3) 干燥时间与能耗 干燥时间, 采用不用干燥方式将鲜蕨麻干燥至湿基含水率为 12% 左右, 每组试验重复 3 次, 测定其干燥时间, 取其平均值; 干燥能耗, 使用电能表测量每组试验干燥能耗, 取其平均值。

4) 色泽 采用色差仪测定。将待测蕨麻平铺在白纸上, 采用便携式色差仪进行测定, 测定 3 次, 取平均值, L^* 表示亮度, a^* 表示红绿(正值为红色, 负值为绿色), b^* 表示黄蓝(正值为黄色, 负值是蓝色)。

5) 质构特性 物性测定参考罗南等^[17]的测定方法, 利用质构剖面分析模式(TPA), 安装 100 N 量感元, 选用圆柱型探头, 设置测试距离 15

mm, 初始检测速度 0.5 mm/s, 压缩形变量 50%, 挑选体积、样品高度相近的 3 份蕨麻样品, 分别测量 3 次, 取各项物性数据平均值。

6) 味觉 称取 10 g 干燥蕨麻样品, 加入 100 mL 去离子水打成浆状, 置于锥形瓶中, 放入超声机中处理 20 min 后离心 10 min (3 500 r/min), 取上清液 80 mL 进行味觉分析。使用 SA402B 味觉分析仪, 加载酸、甜、苦、咸、鲜、涩味 6 种传感器电极, 每个样品平行 3 次, 按设定程序检测。

7) 感官评价 由 10 名(男、女各 5 名)本单位专业的感官评定人员组成, 分别对不同方式干燥后, 蕨麻的色泽、气味、形状、不完善粒 4 个方面进行评价^[18], 取平均值, 感官评分标准见表 1。

表 1 蕨麻感官评分表

Table 1 Sensory evaluation table of *Potentilla anserina*

指标	权重/%	优(100~80分)	中(80~60分)	差(60分以下)
色泽	25	表面浅褐色, 无光泽, 断面呈乳白色	表面深褐色, 无光泽, 断面呈乳白色至淡黄色	表面深褐色, 无光泽, 断面呈淡黄色
气味	25	具有蕨麻固有的气味, 味微甜, 无异味	具有蕨麻固有的气味, 味微甜, 稍有异味	具有蕨麻固有的气味, 味微甜, 有异味
形状	25	果形为多球形, 少为多样性	果形为多样性, 少为多球形	果形为多样性
不完善粒	25	≤1%	≤2%	≤3%

8) 复水比^[19] 取一定量的蕨麻, 浸泡在 60 ℃ 热水中 30 min, 使干燥后蕨麻恢复到其原始状态, 再沥干, 称重, 试验重复 3 次, 取平均值, 复水比按公式(4)计算。

$$R = \frac{m_1}{m_2} \quad (4)$$

式中: R 为复水比, g/g; m_1 为复水后质量, g; m_2 为复水前质量, g。

9) 还原糖^[20] 根据《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》(GB 5009.7—2016)中第一法直接滴定法测定还原糖。

10) 维生素 C^[21] 根据《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》(GB 5009.86—2016)中第三法 2,6-二氯酚酚滴定法测定维生素 C。

1.3.3 综合评价方法^[15] 层次分析法常被应用于解决综合评价等问题, 主要用来在做决策时, 给目标的多个影响因子做权重评分, 本文运用层次分

析法对鲜蕨麻干燥技术进行综合评价。首先, 建立层次结构模型, 以适宜鲜蕨麻干燥技术为目标层, 以干燥时间、干燥能耗、干燥后感官评分、复水比、还原糖、维生素 C 含量为准则层, 以不同干燥技术 HAD、HPD、CFFD、CFFCHPD、VPD、VFD 为方案层, 如图 1 所示。其次, 构造判断矩阵, 将准则层 6 个评价标准两两比较, 根据调研蕨麻生产、销售主体对 6 个标准的重要性打分, 按照表 2 的重要性标度含义进行相对重要性排序, 构造准则层判断矩阵 A ; 将方案层 6 个干燥技术基于 6 个评价标准的表现进行两两比较, 根据干燥试验显著性分析结果按照表 2 的重要性标度含义进行相对重要性排序, 相同水平间使用同一标度, 构造方案层判断矩阵 $B_1、B_2、B_3、B_4、B_5、B_6$ 。再次, 计算单排序权向量并做一致性检验, 对每个判断矩阵计算最大特征值及其对应的特征向量, 利用一致性指标 CI 、随机一致性指标 RI 和一致性比率 CR 做一致性检

验,即根据公式(5)和(6)计算。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

式中: λ_{max} 为判断矩阵最大特征根; n 为判断矩阵阶数; RI 为与 n 对应的平均随机一致性取值,如表 3 所示,当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵具有良好的-一致性,特征向量(归一化后)即为权向量;

否则应调整判断矩阵元素的取值,重新构造判断矩阵。最后,计算总排序权向量并做-一致性检验,计算最下层对最上层总排序的权向量,利用总排序-一致性比率进行检验,即根据公式(7)计算。

$$CR = \frac{a_1 CI_1 + a_2 CI_2 + \dots + a_m CI_m}{a_1 RI_1 + a_2 RI_2 + \dots + a_m RI_m} \quad (7)$$

若通过,则可按照总排序权向量表示的结果进行决策,否则需要重新考虑模型。

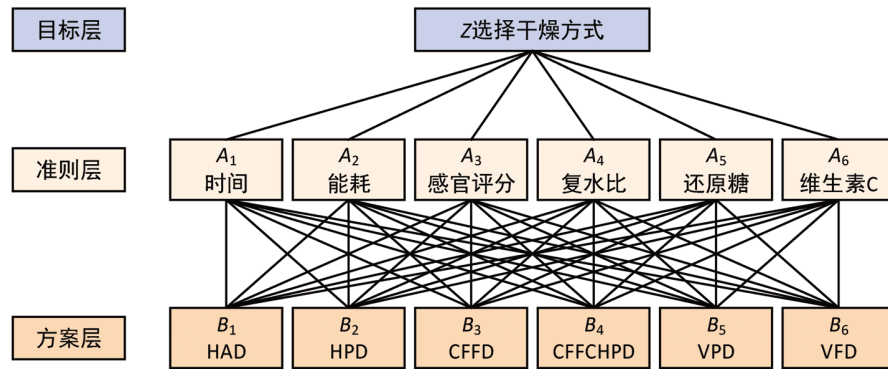


图 1 鲜蕨麻干燥技术评价层次结构模型

Fig.1 Hierarchical structure model of fresh *Potentilla anserina* drying technology evaluation

表 2 指标相对重要性等级表

Table 2 Rating scales of relative importance of index

标度	对比结果
1	表示 2 个因素相比,具有同等重要
3	表示 2 个因素相比,前者比后者稍微重要
5	表示 2 个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示 2 个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示 2 个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	以上重要性的中间值
倒数	若 i 与 j 的重要性之比为 a_{ij} ,则 j 与 i 的重要性之比为 $1/a_{ij}$

表 3 随机性指标 RI 数值

Table 3 Randomness index RI value

阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

1.4 数据处理

试验数据使用 Office Excel 2013、SPSS 20 软件进行统计、差异显著性分析以及层次分析法计算,使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式对鲜蕨麻干燥特性的影响

由图 2a 可知,不同干燥方式下鲜蕨麻水分比随干燥时间的延长呈现下降的趋势。干燥温度(45 ℃)一定时,干燥至鲜蕨麻安全含水率,不同干

干燥方式所需干燥时间由短到长依次为 CFFCHPD、CFFD、HAD、HPD、VPD, 采用 CFFCHPD 的干燥时间最短, 这是由于 CFFCHPD 在干燥箱前期升温 and 稳定干燥箱内部温度有较大优势, 同时远红外干燥利用红外辐射可穿透物料表层并被物料内部的粒子吸收, 加剧粒子的振动和摩擦, 使物料内部升温, 物料表层水分被热风带走, 形成湿度梯度, 热质传递方向相同, 有利于水分脱除^[22]。VPD 同样采用远红外加热, 然而干燥时间最长, 是由于鲜蕨麻含水率高, VPD 干燥室内水汽不易被带走所致^[23]。HPD 干燥时间长于 CFFD 和 HAD, 是因为热泵干燥初期升温慢, 同时热泵烘干设备热惯性小,

本次试验排湿风机一直处于开启状态, 余热未被充分利用, 升温慢所致。由图 2b 可知, 采用 CFFCHPD 和 CFFD, 在干燥过程中干燥速率呈上升趋势, 采用 HAD、HPD 及 VPD, 干燥速率呈先上升后趋于稳定, 说明干燥过程是由表面水分蒸发和内部水分扩散共同控制, CFFCHPD 和 CFFD 利用远红外辐射有效解决干燥后期水分脱除缓慢的问题, VPD 在干燥过程中干燥速率在 0.1~0.2 g/(g·h) 之间, 显著低于其它干燥方式, 主要是因为 VPD 干燥室内空气流动慢, 相对湿度大, 不利于水分散失所致。

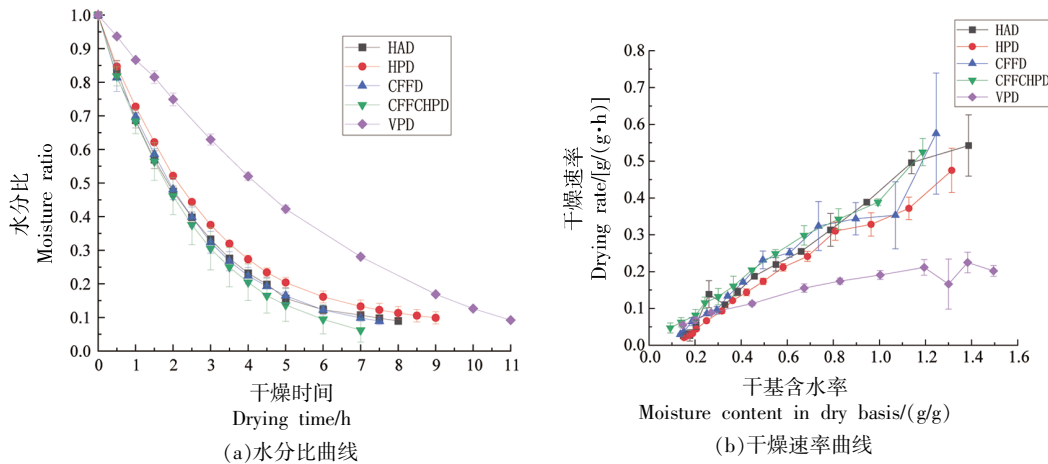
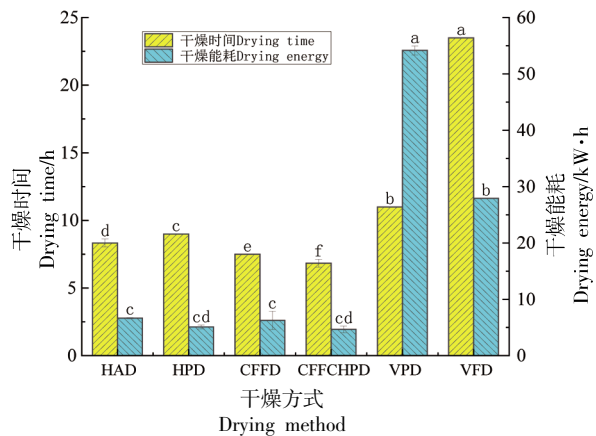


图 2 不同干燥方式鲜蕨麻的干燥特性曲线

Fig.2 Drying characteristic curves of fresh *Potentilla anserina* with different drying methods

2.2 不同干燥方式对鲜蕨麻干燥时间与能耗的影响

由图 3 可知, 采用不同干燥方式, 鲜蕨麻所需干燥时间有显著性差异 ($P < 0.05$), 干燥时间由短到长依次为 CFFCHPD、CFFD、HAD、HPD、VPD、VFD, 采用 VFD 干燥时间最长, VFD 需要经历冷冻、真空、加热 3 个阶段, 因此干燥时间较长^[24], 采用 CFFCHPD 可有效缩短干燥时间, 相较于 CFFD、HAD、HPD、VPD、VFD 分别缩短了 9.76%、21.95%、31.71%、60.98%、243.91%。采用 CFFCHPD、CFFD、HAD、HPD 干燥能耗具有显著性差异 ($P < 0.05$), 这是由于本次研究中仅研究加热方式的影响, 所有组的排湿风机一直处于开启状态, 余热未被充分利用, HPD 未能体现节能的效



注: 同一指标中, 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 3 不同干燥方式对鲜蕨麻干燥时间和干燥能耗的影响

Fig.3 Effects of different drying methods on drying time and energy consumption of fresh *Potentilla anserina*

果,由于 CFFCHPD 干燥速率快,干燥能耗最低,VPD 的干燥能耗显著高于其它组($P<0.05$),分别是 CFFCHPD、CFFD、HAD、HPD、VFD 的 11.6,8.6,8.1,10.6,1.9 倍,主要是因为 VPD 设备相较于其它设备,除需要加热单元外,还需要真空泵以及冷却装置,同时干燥速率较慢所致,说明 VPD 不适合用于鲜蕨麻的干燥。

2.3 不同干燥方式对鲜蕨麻干燥品质的影响

2.3.1 不同干燥方式对鲜蕨麻色泽的影响 色泽是评价蕨麻干制品的重要指标之一,对商品价值有重要影响^[25]。鲜蕨麻干燥后色泽测定结果如图 4 所示,除 VFD 方式外,其它方式干燥后蕨麻的 L^* 值显著低于干燥前 ($P<0.05$), L^* 值表示物料的亮度,其值越大,亮度越大,说明干燥使蕨麻的亮度变暗,除 HAD 和 CFFD 方式以外,其它方式干燥蕨麻的 L^* 值有显著性差异($P<0.05$),其中 VFD 方式的 L^* 值最高,说明真空冷冻干燥能够很好保持蕨麻的亮度,可能是在低温及真空条件下,不利于蕨麻发生酶促褐变以及美拉德反应,采用其它几种干燥方式,蕨麻的 L^* 值不同,可能与干燥时间及干燥室湿度及温度惯性有关。干燥后蕨麻的 a^* 值和 b^* 值均显著高于干燥前 ($P<0.05$), a^* 值表示红绿度, b^* 值表示黄蓝度,说明干燥后蕨麻的色泽偏红和偏黄,其中采用 CFFCHPD、VFD 及 VPD 方式干燥,蕨麻的 a^* 值和 b^* 值变化较大,可能因为 CFFCHPD 方式干燥室的温度保持的好,VFD、VPD 方式干燥时间长,特别是 VPD 方式在干燥过程中干燥室的湿度较大,有利于酶促反应以及美

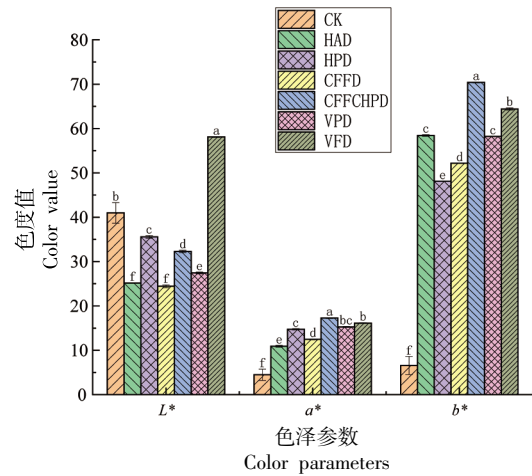


图 4 不同方式对鲜蕨麻色泽的影响
Fig.4 Effects of different methods on the color of fresh *Potentilla anserine*

拉德反应的进行,从而导致蕨麻氧化或褐变。综合来看,不同干燥方法对蕨麻色泽的影响较大,干燥时间、干燥过程中相对湿度、温度、氧气等对蕨麻的色泽变化都有较大影响。

2.3.2 不同干燥方式对鲜蕨麻质构特性的影响 采用不同方式干燥的蕨麻的质构特性(硬度、弹性、胶黏性及咀嚼性)结果如图 5 所示。从硬度方面来看,CFFD 与 VPD 之间差异不显著,其它方式干燥是蕨麻的硬度差异显著($P<0.05$),硬度由大至小依次为 $HPD>CFFD>VPD>HAD>CFFCHPD>VFD$,采用 VFD 方式的硬度值最小,为 13.18 N,是因为 VFD 干燥过程中蕨麻内水分从冰晶状态直接升华,其结构基本保持了原有形状,形成多孔性结

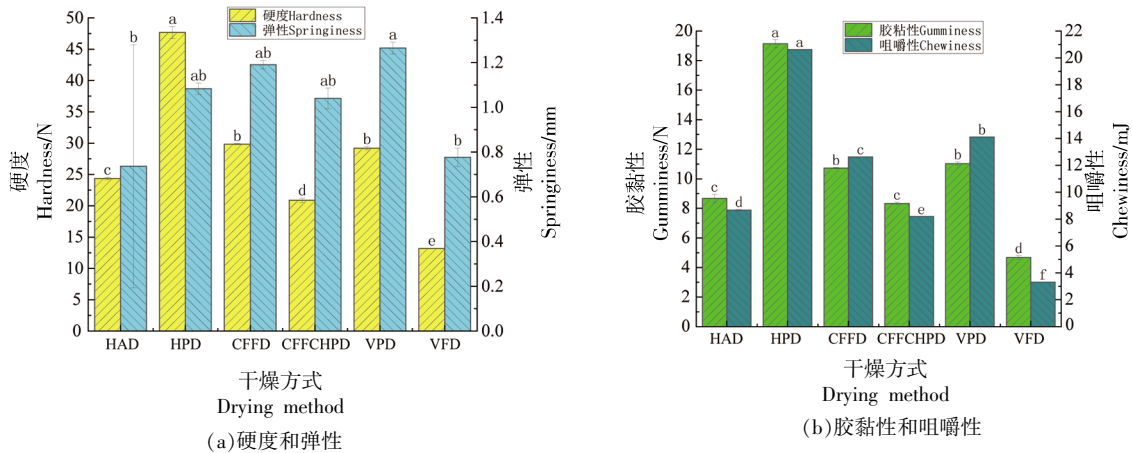


图 5 不同方式对鲜蕨麻物性的影响

Fig.5 Effects of different methods on the physical properties of fresh *Potentilla anserine*

构,收缩也最小^[26],因此硬度最小。在热风干燥过程中,温度从物料外部向内部传递,因此蕨麻的表面温度高于内部,水分从内部向外部传递,热质传递方向相反,因蕨麻内部水分未能及时转移到表面,随着表面水分的蒸发迁移,细胞迅速收缩在表面形成一层干硬膜^[27],因此热风干燥的蕨麻,硬度大,因本试验 HPD 干燥时间较 HAD 长,因此采用 HPD 方式干燥的蕨麻硬度大于 HAD。从弹性方面来看,采用 VPD 方式干燥的蕨麻弹性显著高于其它方式($P<0.05$),这可能是因为 VPD 方式在真空和常压交替作用下,同时在干燥过程中,干燥室内湿度较大,更好地保持蕨麻内部的组织结构所致。从胶黏性方面来看,不同方式干燥后,蕨麻的胶黏性规律硬度相似,同样是采用 HPD 方式,胶黏性最大,采用 VFD 方式,胶黏性最小。从咀嚼性方面来看,采用不同方式干燥蕨麻的咀嚼性由大至小为 HPD>VPD>CFFD>HAD>CFFCHPD>VFD。综合来看,不同干燥方式对蕨麻的物性影响较大,在实际生产中,要根据实际要求选择干燥方式。

2.3.3 不同干燥方式对鲜蕨麻味觉的影响 味觉作为一种基本的感官属性,可以评价呈味物质的营养成分,并防止有毒物质摄入^[28]。不同干燥方式的蕨麻电子舌味觉属性值如图 6 所示,除苦味与甜味及咸味之间,蕨麻各滋味值及丰富度之间存在显著性差异($P<0.05$),在 6 个味觉属性中,其中鲜、甜、苦、咸味突出。从鲜味值来看,不同方式干燥的蕨麻的鲜味值在 11.68~12.51 之间,其中 HPD 方式最高,为 12.51;从甜味值来看,不同方式干燥的蕨麻的甜味值在 8.01~8.52 之间,没有较大差异;从苦味值来看,不同方式干燥的蕨麻的苦味值在 7.49~8.66 之间,其中 CFFD 方式最高,为 8.66, HAD 方式最低,为 7.49,从咸味值来看,不同

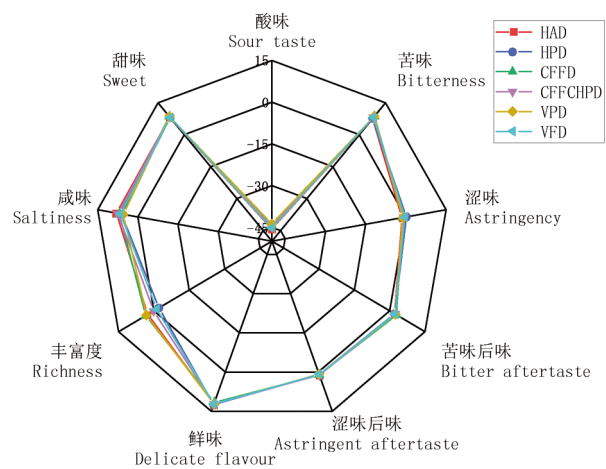


图 6 不同方式对鲜蕨麻味觉的影响

Fig.6 Effects of different methods on the taste of fresh *Potentilla anserina*

方式干燥的蕨麻的咸味值在 5.42~7.98 之间,存在较大差异,其中 VPD 方式最低,为 5.42, HAD 方式最高,为 7.98;对于丰富度,各干燥方式之间的差异较大,不同方式干燥后蕨麻的丰富度由大至小为:CFFD>VPD>HAD>CFFCHPD>VFD>HPD,蕨麻中的苦味,主要来源于蕨麻表皮,甜味主要由于蕨麻中还有多糖,本试验不同干燥方式设置的温度都为 45 °C,因此对蕨麻的味觉影响不大。

2.3.4 不同干燥方式对鲜蕨麻感官评价的影响 食品感官评价是指对食品的口感、味道、色泽、气味等方面进行评估,通常采用量化打分的方式,是检验食品质量和特性的科学方法^[29]。经过不同干燥方式处理后的蕨麻在色泽、气味、形状等方面变化不同,由表 4 可知,在色泽方面, VFD 方式评分最低,这与采用色差仪测定的结果有一定的相关性;在气味方面,不同干燥方式的评分结果由大到

表 4 不同干燥方式下鲜蕨麻感官评分

Table 4 Sensory score of fresh *Potentilla anserina* under different drying methods

指标	干燥方式					
	HAD	HPD	CFFD	CFFCHPD	VPD	VFD
色泽	21.00 ± 2.08 ^a	20.47 ± 3.17 ^a	20.31 ± 2.95 ^a	21.00 ± 2.27 ^a	20.94 ± 2.68 ^a	20.25 ± 2.29 ^a
气味	20.31 ± 2.55 ^a	19.50 ± 2.90 ^a	20.67 ± 2.33 ^a	20.67 ± 2.91 ^a	20.61 ± 2.53 ^a	20.97 ± 1.42 ^a
形状	20.33 ± 2.92 ^a	20.64 ± 2.89 ^a	20.06 ± 2.92 ^a	20.42 ± 3.18 ^a	20.89 ± 2.80 ^a	20.64 ± 2.17 ^a
不完善粒	20.42 ± 2.87 ^a	19.94 ± 1.94 ^a	20.64 ± 2.39 ^a	20.31 ± 2.85 ^a	20.56 ± 2.18 ^a	21.94 ± 1.96 ^a
综合评价	82.06 ± 9.86 ^a	80.56 ± 8.44 ^a	81.67 ± 8.25 ^a	82.39 ± 10.13 ^a	83.00 ± 8.50 ^a	83.81 ± 6.76 ^a

注:同一指标中,相同肩标字母表示无显著性差异($P>0.05$)。

小依次为 VFD>CFFD=CFFCHPD>VPD>HAD>HPD; 在形状方面, 采用 VPD 方式评分最高, 为 20.89 分, 采用 CFFD 方式评分最低, 为 20.06 分; 在不完善粒方面, VFD 方式评分最高, 综合评分由大到小分别为 VFD>VPD>CFFCHPD>HAD>CFFD>HPD; 综合来看, 采用 VFD 方式, 蕨麻的感官品质最好, 其次为 VPD 方式, 这两种方式干燥时间都较长, 同时采用真空方式, 抑制了褐变的发生, 对蕨麻的感官有一定促进, 而各方式间的差异均不显著 ($P>0.05$), 这可能是由于存在线性差异导致。

2.3.5 不同干燥方式对鲜蕨麻复水比的影响 复水能力能够反映样品的结构完整性, 复水比越高, 说明产品的结构组织被破坏程度越小, 品质越好^[30]。不同干燥方式干燥后蕨麻的复水比如图 7 所示, 不同干燥方式对蕨麻的复水比有显著性影响 ($P<0.05$), 复水比由大到小依次为: VFD>HPD>VPD>CFFCHPD>CFFD>HAD, 采用 VFD 干燥后蕨麻的复水比最高为 2.11, 相较于 VFD, 其它干燥方式复水比分别降低了 9.97%, 11.58%, 12.61%, 15.95%, 19.18%, 这可能是因为采用 VFD 方式, 物料中的水分主要以升华方式脱出, 形成了良好的多孔结构, 物料本身的体积几乎不变, 保持了原来的结构^[19], 因此复水比较高。采用 VPD 的复水比高于 CF-

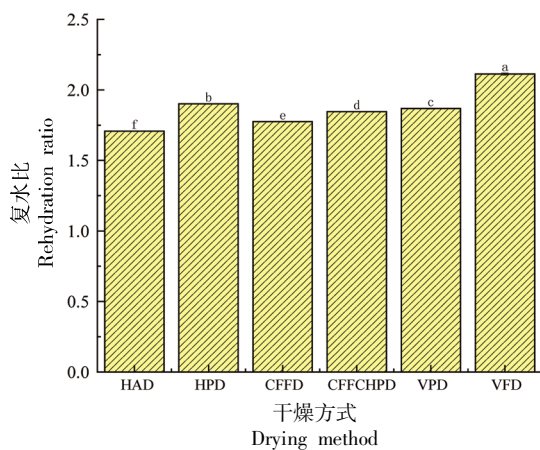


图 7 不同方式对鲜蕨麻复水比的影响

Fig.7 Effects of different methods on the rehydration ratio of fresh *Potentilla anserine*

2.3.7 不同干燥方式对鲜蕨麻维生素 C 的影响 维生素 C, 也称抗坏血酸, 是一种有机化合物,

FCHPD、CFFD、HAD, 可能是因为在干燥过程中 VPD 干燥室相对湿度一直较大, 蕨麻干缩变形不大所致。采用 HAD 干燥后蕨麻的复水比最低为 1.13, 主要因为热风干燥使蕨麻干缩变形严重, 阻碍水分进入^[31], 采用 HAD 的复水比显著低于 HPD ($P<0.05$), 可能与干燥时间及干燥过程中温度控制惯性有关。

2.3.6 不同干燥方式对鲜蕨麻还原糖的影响 还原糖是指具有还原性的糖类, 在糖类中, 分子中含有游离醛基或酮基的单糖和含有游离醛基的二糖都具有还原性, 包括葡萄糖、果糖、半乳糖、乳糖、麦芽糖等, 还原糖可以作为一种保鲜剂, 用于延长食品的保质期^[32]。由图 8 可知, 相较于刚采收的鲜蕨麻, 干燥后的蕨麻中还原糖含量显著增加 ($P<0.05$), 其原因可能是在干燥过程中蕨麻部分淀粉被淀粉酶分解转化成糖, 糖再进一步分解为还原糖^[33]。不同干燥方式干燥后的蕨麻还原糖含量由高到底依次为: VPD>HPD>CFFCHPD>CFFD>HAD>VFD, 相较于鲜蕨麻分别提高了 111.21%, 106.57%, 97.92%, 93.46%, 82.96%, 60.28%, 其中 VFD 干燥后还原糖含量提高最少, VPD 干燥后还原糖含量提高最多, 其原因可能是 VFD 使酶的活性降低, 淀粉转化成还原糖的量较少, VPD 干燥时间较长, 淀粉转化成还原糖的量较多。

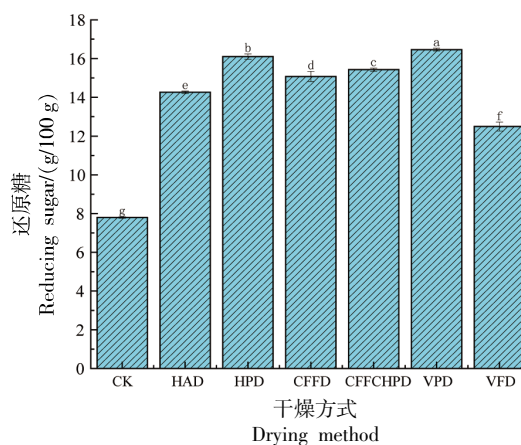


图 8 不同方式对鲜蕨麻还原糖的影响

Fig.8 Effects of different methods on reducing sugar in fresh *Potentilla anserine*

是蕨麻中重要的营养成分之一, 它具有抗氧化的作用, 有助于提高身体的免疫力和预防感染, 促进

免疫系统的正常运转。维生素 C 容易受光、氧气、热、水分含量等因素的影响而被破坏^[34]。鲜蕨麻在较长时间的干燥过程中,会造成维生素 C 的损失,由图 9 可知,鲜蕨麻经过不同干燥方式干燥后,除了 VFD,其它干燥方式与对照组相比,维生素 C 含量均显著降低($P<0.05$),维生素 C 含量由高到底依次为:VFD>HAD>HPD>CFFD>CFFCHPD>VPD,其中采用 VPD 干燥后,维生素 C 降解最多,含量下降 60.68%,可能是 VPD 干燥时间较长,干燥过程中干燥室里湿度大所致,采用 VFD 干燥后,维生素 C 含量有所上升,这可能是因为 VFD 对蕨麻中维生素 C 破坏较小,同时样品品质不一导致。采用 HAD 和 HPD,维生素 C 含量分别下降了 25.32%和 25.84%,没有显著性变化($P>0.05$),而采用 CFFD 和 CFFCHPD,维生素 C 含量分别下降了 39.35%和 44.09%,显著低于 HAD 和 HPD ($P<0.05$),这是因为维生素 C 是热敏性物质,受碳纤维远红外板辐射,同时干燥箱内温度保持较好所致,因此维生素 C 降解较多。

2.4 层次分析和综合评价结果

根据层次分析模型,将 6 个评价标准 (A_1 时间、 A_2 能耗、 A_3 感官评分、 A_4 复水比、 A_5 还原糖、 A_6 维生素 C)进行两两比较,根据调研蕨麻生产、销售主体对 6 个标准的重要性打分,按照表 2 的重要性标度含义进行相对重要性排序,构造出判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 4 & 5 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 4 & 5 & 2 & 2 \\ 1/4 & 1/4 & 1 & 2 & 1/3 & 1/3 \\ 1/5 & 1/5 & 1/2 & 1 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & 1/2 & 3 & 3 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/2 & 3 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \text{矩阵中数}$$

据越大,表明行评价标准相对列评价标准更重要。将 6 个干燥技术 (B_1 HAD、 B_2 HPD、 B_3 CFFD、 B_4 CFFCHPD、 B_5 VPD、 B_6 VFD) 在 6 个评价标准的表现进行两两比较,根据干燥试验显著性分析结果,按照表 2 的重要性标度含义进行相对重要性排序,相同水平间使用同一标度,构造出判断矩阵

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/2 & 1/3 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 1/4 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 & 1/2 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 2 & 1 & 4 & 5 \\ 1/3 & 1/2 & 1/4 & 1/4 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix},$$

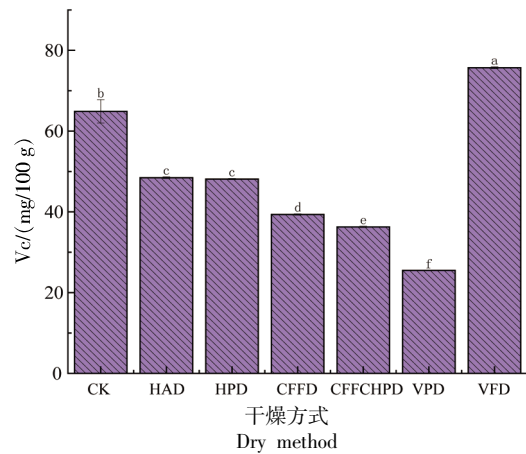


图 9 不同方式对鲜蕨麻维生素 C 的影响

Fig.9 Effects of different methods on vitamin C in fresh *Potentilla anserina*

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1/6 \\ 5 & 1 & 4 & 3 & 2 & 1/2 \\ 2 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1/3 & 2 & 1 & 1/2 & 1/4 \\ 4 & 1/2 & 3 & 2 & 1 & 1/3 \\ 6 & 2 & 5 & 4 & 3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/2 & 1/3 & 1/5 & 2 \\ 4 & 1 & 3 & 2 & 1/2 & 5 \\ 2 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/4 & 3 \\ 3 & 1/2 & 2 & 1 & 1/3 & 4 \\ 5 & 2 & 4 & 3 & 1 & 6 \\ 1/2 & 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1/6 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 & 4 & 1/2 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 4 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 1/3 \\ 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/5 \\ 2 & 2 & 3 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

对判断矩阵进行单排序计算,确定各指标的权重,并做一致性检验,将判断矩阵的各行向量进行几何平均,然后进行归一化,得到各个评价指标的权重: $A_1A_2A_3A_4A_5A_6$ 对 Z 的权重[0.2526, 0.3183,

0.0670, 0.0493, 0.1564, 0.1564], $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ 对 A_1 的权重 [0.1636, 0.1031, 0.2570, 0.3634, 0.0681, 0.0447], $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ 对 A_2 的权重 [0.2065, 0.2065, 0.2065, 0.2065, 0.0656, 0.1083], $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ 对 A_3 的权重 [0.1667, 0.1667, 0.1667, 0.1667, 0.1667, 0.1667], $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ 对 A_4 的权重 [0.0425, 0.2516, 0.0643, 0.1009, 0.1602, 0.3806], $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ 对 A_5 的权重 [0.0643, 0.2516, 0.1009, 0.1602, 0.3806, 0.0425], $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ 对 A_6 的权重 [0.2093, 0.2093, 0.1233, 0.0799, 0.0494, 0.3287]。

为了保证计算结果的科学性和可靠性, 必须对判断矩阵进行一致性检验, 根据公式 (5)、公式 (6) 得到各判断矩阵的 CR 值分别为 0.0462, 0.0669, 0.0037, 0, 0.0490, 0.0490, 0.0372, 均小于 0.1, 通过一致性检验。计算层次总排序权值和一致性检验,

B_1 对总目标的权值为: $0.1636 \times 0.2526 + 0.2065 \times 0.3183 + 0.1667 \times 0.0670 + 0.0425 \times 0.0493 + 0.0643 \times 0.1564 + 0.2093 \times 0.1564 = 0.1631$

B_2 对总目标的权值为: $0.1031 \times 0.2526 + 0.2065 \times 0.3183 + 0.1667 \times 0.0670 + 0.2516 \times 0.0493 + 0.2516 \times 0.1564 + 0.2093 \times 0.1564 = 0.1874$

B_3 对总目标的权值为: $0.2570 \times 0.2526 + 0.2065 \times 0.3183 + 0.1667 \times 0.0670 + 0.0643 \times 0.0493 + 0.1009 \times 0.1564 + 0.1233 \times 0.1564 = 0.1800$

B_4 对总目标的权值为: $0.3634 \times 0.2526 + 0.2065 \times 0.3183 + 0.1667 \times 0.0670 + 0.1009 \times 0.0493 + 0.1602 \times 0.1564 + 0.0799 \times 0.1564 = 0.2112$

B_5 对总目标的权值为: $0.0681 \times 0.2526 + 0.0656 \times 0.3183 + 0.1667 \times 0.0670 + 0.1602 \times 0.0493 + 0.3806 \times 0.1564 + 0.0494 \times 0.1564 = 0.1244$

B_6 对总目标的权值为: $0.0447 \times 0.2526 + 0.1083 \times 0.3183 + 0.1667 \times 0.0670 + 0.3806 \times 0.0493 + 0.0425 \times 0.1564 + 0.3287 \times 0.1564 = 0.1338$

方案层对总目标的权重为 [0.1631, 0.1874, 0.1800, 0.2112, 0.1244, 0.1338], 又根据公式 (7) 可知, $CR = (0.2526 \times 0.0835 + 0.3183 \times 0.0046 + 0.0670 \times 0 + 0.0493 \times 0.0612 + 0.1564 \times 0.0612 + 0.1564 \times 0.0465) / 1.24 = 0.0342 < 0.1$, 层次总排序通过一致性检验。方案的权重排序为 $B_4 > B_2 > B_3 > B_1 > B_6 > B_5$, 即 CFFCH-
PD > HPD > CFFD > HAD > VFD > VPD, CFFCHPD 组的

权重最高, 其次是 HPD 组, VPD 组的权重最低。若考虑设备制造成本, HAD 设备制造成本低, 相对 HAD, CFFCHPD 设备制作成本更高^[6]。VPD 组的权重最低, 说明 VPD 不适合用于鲜蕨麻的干燥, 并且 VPD 设备相较于 HAD 与 CFFCHPD 设备需要真空泵、真空压力罐、碳纤维远红外加热板、多路温控仪, 更多的温度传感器, 制作成本更高。建议需要对鲜蕨麻进行干燥的生产经营主体, 根据自身经济情况优先采用 CFFCHPD 或 HPD 干燥技术。

3 结论

利用 6 种干燥方式对鲜蕨麻进行干燥, 综合分析不同干燥方式鲜蕨麻的干燥特性、干燥时间、干燥能耗、干燥后感官评分、复水比、还原糖及维生素 C 含量等指标, 并采用层次分析法进行综合评价, 主要获得以下结论:

1) 采用 CFFCHPD 方式, 干燥时间及能耗最低, 相较于其它方式效率最高, 采用 VPD 方式干燥时间及能耗显著高于其它 5 组, 效率最低。

2) 鲜蕨麻干燥后, 除 VFD 方式以外, 其它方式的 L^* 值显著低于干燥前 ($P < 0.05$), a^* 值和 b^* 值显著高于干燥前 ($P < 0.05$), 说明干燥后蕨麻亮度变暗, 色泽偏红和偏黄; 不同干燥方式的蕨麻的弹性没有太大差异, 在硬度、胶黏性及咀嚼性方面有较大差异, 其中 HPD 方式最高, VFD 最低; 干燥后蕨麻的电子舌味觉中, 鲜、甜、苦、咸味较突出, 不同干燥方式的丰富度差异明显; 不同方式干燥后, 蕨麻的感官评分差异不显著 ($P > 0.05$), VFD 方式最高; 采用 VFD 方式干燥后蕨麻的复水性最好。

3) 干燥后蕨麻的还原糖含量显著提高, 除 VFD 方式以外, 维生素 C 含量显著降低, 其中 VPD 方式还原糖含量最高, 维生素 C 含量最低, VFD 方式还原糖含量最低, 维生素 C 含量最高, 还原糖升高的原因可能是干燥过程中蕨麻的部分淀粉被淀粉酶分解转化成糖, 糖再进一步分解为还原糖, 维生素 C 是热敏性物质, 干燥过程容易降解。

4) 采用层次分析法的综合评价结果为: CFFCHPD > HPD > CFFD > HAD > VFD > VPD, CFFCHPD 的权重最高, 其次是 HPD, 此研究为蕨麻的干燥提

供了理论依据与技术支持。

参 考 文 献

- [1] 石子林, 李军乔, 王雅琼, 等. 蕨麻地上部分多糖提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 720-726.
SHI Z L, LI J Q, WANG Y Q, et al. Optimization on the extraction process of polysaccharide from the aerial part of *Potentilla anserina* L. and its antioxidant activity[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(3): 720-726.
- [2] 谭亮, 李军乔, 李玉林, 等. 青海不同产地蕨麻营养成分分析及品质评价[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(1): 95-111.
TAN L, LI J Q, LI Y L, et al. Analysis of nutritional compositions and evaluation of quality in *Potentilla anserina* L. from Qinghai different producing areas[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(1): 95-111.
- [3] 丁耀光, 马富花, 苟如虎. 蕨麻中多糖提取工艺研究及含量测定 [J]. 广东农业科学, 2014, 41(11): 106-108.
DING Y G, MA F H, GOU R H. Study on the extraction process and content determination of polysaccharides in *Potentilla anserine*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(11): 106-108.
- [4] 何江涛. 蕨麻栽培及加工利用探究[J]. 世界热带农业信息, 2020(7): 13-14.
HE J T. Study on the cultivation and processing and utilization of *Potentilla anserina*[J]. World Tropical Agriculture Information, 2020(7): 13-14.
- [5] 王乐意, 李长河, 刘明政, 等. 中药材干燥技术与装备研究现状[J/OL]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 1-28.
WANG L Y, LI C H, LIU M Z, et al. Research status of drying technology and equipment of Chinese medicinal materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 1-28.
- [6] ZHAO Y Y, BI J F, YI J Y, et al. Evaluation of sensory, textural, and nutritional attributes of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) as prepared by five types of drying methods[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42: e13029
- [7] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 碳纤维红外板辐射特性及其农产品物料干燥试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 285-293.
ZHANG W P, XIAO H W, GAO Z J, et al. Infrared drying properties and drying experiment of carbon fiber for agricultural production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 285-293.
- [8] 杨丽丽, 马奇虎, 李重, 等. 枸杞真空脉动干燥工艺优化研究[J]. 食品工业, 2018, 39(11): 74-77.
YANG L L, MA Q H, LI Z, et al. Technology optimization of goji berry undergoing pulsed vacuum drying[J]. The Food Industry, 2018, 39(11): 74-77.
- [9] 薛令阳, 王书茂, MUJUMDAR A S, 等. 基于干燥均匀性的真空脉动干燥加热控制技术[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 317-325.
XUE L Y, WANG S M, MUJUMDAR A S, et al. Heating control technology of vacuum pulse drying based on drying uniformity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 317-325.
- [10] 侯演林, 陈胜慧子, 蒲云峰, 等. 真空冷冻干燥及预处理方法应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(23): 203-208.
HOU Y L, CHEN S H Z, PU Y F, et al. Research progress in the application of vacuum freeze-drying and pretreatment methods[J]. Food Research and Development, 2023, 44(23): 203-208.
- [11] 谢永康, 李莹莹, 李萍, 等. 花生碳纤维远红外联合热泵干燥特性及品质研究[J]. 花生学报, 2022, 51(4): 80-89.
XIE Y K, LI Y Y, LI P, et al. Study on drying characteristics and quality of peanut by carbon fiber far-infrared combined heat pump [J]. Journal of Peanut Science, 2022, 51(4): 80-89.
- [12] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 基于Weibull分布函数的枸杞真空脉动干燥过程模拟及动力学研究[J]. 中草药, 2018, 49(22): 5313-5319.
JU H Y, ZHAO S H, ZHAO H Y, et al. Vacuum pulsed drying characteristics of *Lycii fructus* based on Weibull distribution model[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(22): 5313-5319.
- [13] 代建武, 付琪其, 黄欢, 等. 青花椒真空脉动干燥特性及干燥品质工艺优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 279-287.

- DAI J W, FU Q Q, HUANG H, et al. Drying characteristics and quality optimization of green prickly ashes during vacuum pulsed drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 279–287.
- [14] 向望, 华明, 白志勇. 基于层次分析的综合指数法对滑坡危险性评价[J]. 路基工程, 2008(5): 197–199.
- XIANG W, HUA M, BAI Z Y. Comprehensive index method based on analytic hierarchy process for landslide risk assessment[J]. Subgrade Engineering, 2008(5): 197–199.
- [15] 向欣, 罗煜, 程红胜, 等. 基于层次分析法和模糊综合评价的沼气工程技术筛选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 205–212.
- XIANG X, LUO Y, CHENG H S, et al. Biogas engineering technology screening based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 205–212.
- [16] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 光皮木瓜真空脉动干燥特性及神经网络模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 147–153.
- JU H Y, ZHAO S H, ZHAO H Y, et al. Drying characteristics of *Chaenomeles sinensis* with vacuum pulsed drying technology based on BP neural network mode[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 147–153.
- [17] 罗南, 普布曲宗, 索朗单增, 等. 挤压再造蕨麻-青稞工程米螺杆转速优化研究[J]. 农产品加工, 2018(16): 6–9.
- LUO N, PUEBLA Q Z, SOLAUN D Z, et al. Study on the optimization of screw rotation speed of extruded *potentilla*-barley engineering rice[J]. Farm Products Processing, 2018(16): 6–9.
- [18] 青海省卫生健康委员会. 食品安全地方标准 蕨麻(干制品): DBS63/0001—2021[S]. 青海: [出版者不详], 2021: 1–4.
- Qinghai Provincial Health Commission. Food safety local standard *Potentilla anserina* (dried products): DBS63/0001—2021[S]. Qinghai: [s.n.], 2021: 1–4.
- [19] 王海鸥, 谢焕雄, 陈守江, 等. 不同干燥方式对柠檬片干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 292–299.
- WANG H O, XIE H X, CHEN S J, et al. Effect of different drying methods on drying characteristics and qualities of lemon slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 292–299.
- [20] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中还原糖的测定: GB 5009.7—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–4.
- National Health and Family Planning Commission. National food safety standard Determination of reducing sugar in food: GB 5009.7—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1–4.
- [21] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定: GB 5009.86—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 7–8.
- National Health and Family Planning Commission. National food safety standard Determination of ascorbic acid in food: GB 5009.86—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 7–8.
- [22] LI X, PAN Z, ATUNGULU G G, et al. Peeling mechanism of tomato under infrared heating: Peel loosening and cracking[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 79–87.
- [23] WANG J, DAI J W, YANG S L, et al. Influence of pulsed vacuum drying on drying kinetics and nutritional value of corn kernels[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(12): e13550.1–e13550.10.
- [24] FERENCZI, S, CZUKOR, B, CSERHALMI Z. Evaluation of microwave vacuum drying combined with hot-air drying and compared with freeze- and hot-air drying by the quality of the dried apple product[J]. Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 2014, 58(2): 111–116.
- [25] VEGA-GÁLVEZ A, SCALA K D, RODRÍGUEZ K, et al. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum* L. var. Hungarian)[J]. Food Chemistry, 2009, 117(4): 647–653.
- [26] LIU Y, ZHANG Z Y, HU L D, et al. High efficient freeze-drying technology in food industry[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(12): 3370–3388.
- [27] 钱婧雅, 张茜, 王军, 等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 259–265.
- QIAN J Y, ZHANG Q, WANG J, et al. Effects of

- three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 259–265.
- [28] 李卫, 张彦青, 解军波, 等. 生物电子舌及其在味觉测定中的应用[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 385–394.
- LI W, ZHANG Y Q, XIE J B, et al. Development of bioelectronic tongue and its application in taste measurement[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 385–394.
- [29] PREDIERI S, MAGLI M, GATTI E, et al. Chemical composition and sensory evaluation of saffron[J]. Foods, 2021, 10(11): 2604.
- [30] XIAO H W, BAI J W, XIE L, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. Food & Bioprocess Processing, 2015, 94: 581–591.
- [31] 王蓉蓉, 丁胜华, 李高阳, 等. 柠檬片热风干燥特性及品质研究[J]. 食品科技, 2016, 41(5): 48–53.
- WANG R R, DING S H, LI G Y, et al. Hot-air drying characteristics and quality attributes of lemon slices[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(5): 48–53.
- [32] 盛金凤, 李丽, 李昌宝, 等. 不同干燥方式对火龙果花品质特性的影响[J]. 食品科技, 2016, 41(2): 98–103.
- SHENG J F, LI L, LI C B, et al. Effects of different drying methods on quality of pitaya flowers[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(2): 98–103.
- [33] 于静静, 毕金峰, 丁媛媛. 不同干燥方式对红枣品质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2011, 27(6): 610–614, 672.
- YU J J, BI J F, DING Y Y, et al. Effect of drying treatment methods on the quality properties of red jujube[J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(6): 610–614, 672.
- [34] GAMBOA –SANTOS J, CRISTINA SORIA A, PÉREZ–MATEOS M, et al. Vitamin C content and sensorial properties of dehydrated carrots blanched conventionally or by ultrasound[J]. Food Chemistry, 2013, 136(2): 782–788.

Studies on Drying Technology of Fresh *Potentilla anserina* Based on Analytic Hierarchy Process

HAN Junhao¹, XIE Yongkang^{1*}, YANG Hui¹, LI Ping¹, LI Xingyi¹, ZHANG Yanzhen², LI Ziang³

¹Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002

²Qinghai Light Industry Institute Co., Ltd., Xining 810000

³International Education College, Henan Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002)

Abstract In order to explore the suitable drying technology of fresh *Potentilla anserina*, six different drying technologies [hot air drying (HAD), heat pump drying (HPD), carbon fiber far-infrared drying (CFFD), carbon fiber far-infrared combined heat pump drying (CFFCHPD), vacuum pulse drying (VPD) and vacuum freeze drying (VFD)] were used to dry fresh *Potentilla anserina*. The effects of different drying technologies on the drying time, drying energy consumption, appearance quality (color, shape), taste (physical property), taste, rehydration ratio and other sensory characteristics, nutritional quality (reducing sugar, vitamin C) content of fresh *Potentilla anserina* were determined. The drying technology of fresh *Potentilla anserina* was comprehensively evaluated by analytic hierarchy process. The results showed that CFFCHPD could effectively shorten the drying time, which was 9.76%, 21.95%, 31.71%, 60.98% and 243.91% shorter than CFFD, HAD, HPD, VPD and VFD, respectively. The drying energy consumption of CFFCHPD, CFFD, HAD and HPD was significantly different ($P < 0.05$). The drying time and energy consumption of CFFCHPD were the lowest, and VPD was the highest. After drying, the brightness of fresh *Potentilla anserina* became darker, and the color was reddish and yellowish. Except for VFD, the L^* value of *Potentilla anserina* dried by other methods was significantly lower than that before drying ($P < 0.05$), and the a^* value and b^* value were significantly higher than those before drying ($P < 0.05$). There was no significant difference in elasticity between different drying methods ($P > 0.05$), but there were significant differences in hardness, adhesiveness and chewiness ($P < 0.05$), among which HPD was the highest and VFD was the

lowest. After drying, the richness of *Potentilla anserina* was significantly different; compared with VFD, the rehydration ratio of other drying methods decreased by 9.97%, 11.58%, 12.61%, 15.95% and 19.18%, respectively. After drying, the reducing sugar content of *Potentilla anserina* L. was significantly increased ($P<0.05$), which was 111.21%, 106.57%, 97.92%, 93.46%, 82.96%, 60.28% higher than that of fresh *Potentilla anserina* L. respectively. Except for VFD method, the content of vitamin C was significantly decreased ($P<0.05$). The content of reducing sugar in VPD method was the highest and the content of vitamin C was the lowest. The content of reducing sugar in VFD method was the lowest and the content of vitamin C was the highest. The comprehensive evaluation results using the analytic hierarchy process were: CFFCHPD>HPD>CFFD>HAD>VFD>VPD, and the comprehensive score of CFFCHPD was the highest, followed by HPD. This study provides a reference for the application of modern drying technology of fresh jute.

Keywords *Potentilla anserina*; drying; sensory evaluation; nutritional quality; analytic hierarchy process